

# Apport du contrôle de puissance et de modulation aux réseaux radio maillés

Anis Ouni<sup>1</sup> and Hervé Rivano<sup>1</sup> and Fabrice Valois<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Lyon, INRIA INSA Lyon, CITI, F-69621, France

---

La capacité du réseau, soit la quantité de trafic qu'il peut écouler par unité de temps, et la consommation énergétique constituent les défis prépondérants des réseaux maillés sans fil. Dans ce papier, nous développons des outils d'optimisation de ces métriques utilisant la technique de génération de colonnes. Nous adoptons un modèle de couche physique réaliste qui prend en considération un modèle d'interférences SINR. Nous étudions l'impact des mécanismes de contrôle de puissance et de modulation sur les performances du réseau. On montre que ces fonctionnalités sont un prérequis nécessaire à un fonctionnement optimal d'un réseau maillé sans fil.

**Keywords:** Réseau maillé sans fil, capacité du réseau, consommation d'énergie, ordonnancement, MCS.

---

## 1 Introduction

Les réseaux maillés sans fil sont une solution efficace pour interconnecter les stations d'accès des réseaux radio. Nous étudions les technologies où le partage des ressources temps-fréquence se fonde sur la technique OFDMA pour permettre à la fois l'accès des clients mobiles/fixes et le relayage de leurs trafics vers des passerelles. Pour satisfaire les applications gourmandes en bande passante, plusieurs travaux s'intéressent à l'amélioration de la capacité de réseau [1, 2]. Cependant, l'augmentation du prix de l'énergie, ainsi que les préoccupations écologiques et sanitaires, poussent à s'intéresser à la minimisation de la consommation énergétique de ces infrastructures. Dans ce travail, nous développons des outils d'optimisation pour maximiser la capacité et minimiser la consommation énergétique totale du réseau.

Nous considérons un réseau radio maillé composé de plusieurs stations de base fixes. Ces dernières sont équipées d'une fonctionnalité de routage et communiquent entre elles par des liaisons radio. Le rôle de chacune est de collecter le trafic généré par les clients mobiles et/ou fixes et de l'envoyer par des chemins multi-saut vers une station spécifique, appelé passerelle. Notre travail se concentre uniquement sur la partie dorsale. Ainsi, nous ne traitons pas les demandes clients mais le trafic agrégé par les stations de base.

Dans un travail préliminaire, des outils d'optimisation ont été développés [3] dans le but d'étudier le compromis entre la capacité et la consommation énergétique, mais avec un modèle d'interférences binaire simple. Dans ce papier, nous étendons ces outils en introduisant le modèle d'interférences SINR et la possibilité pour les nœuds de contrôler leur puissance d'émission ainsi que leur modulation et schéma de codage à chaque transmission. Nous montrons que ces dernières fonctionnalités ont un impact majeur sur le compromis entre capacité et consommation énergétique.

## 2 Modélisation du réseau

Le réseau radio maillé est modélisé par un graphe de transmission  $G(V, E)$ , où  $V$  est l'union disjointe des ensembles de stations de base  $V_{BS}$  et de passerelles  $V_g$ .  $E$  est l'ensemble des liens correspondant aux transmissions possibles entre les sommets de  $V$ . Chaque station de base  $v \in V_{BS}$  envoie périodiquement une demande  $d_v$ , qui sera routée vers une passerelle par des chemins multi-saut. Comme on travaille dans le cadre d'un réseau synchronisé fonctionnant en régime permanent, slotté et donc périodique, la capacité du réseau est la quantité de trafic reçu par les passerelles pendant la période  $T$ ,  $\frac{\sum_v d_v}{T}$ . Optimiser la capacité revient à minimiser le nombre de slots (équivalent à la période  $T$ ) utilisés pour activer les liens qui écoulent ce trafic. Une technique d'ordonnancement intéressante serait de maximiser la réutilisation spatiale en activant

autant de liens possible dans chaque slot. Cet objectif doit être réalisé sous les contraintes d'interférences et de consommation énergétique.

Soit  $(u, v) \in E$ , on note  $(u, v, k)$  la transmission entre l'émetteur  $u$  et le récepteur  $v$  à la fréquence  $k$ . Cette transmission ne peut réussir que si le SINR à la réception dépasse un certain seuil  $\beta$ . Soient  $P_u$  la puissance de transmission de l'émetteur  $u$  et  $L(u, v)$  la fonction d'atténuation exprimant le modèle de propagation. La condition de SINR à la réception en présence de toutes les autres transmissions est la suivante :

$$\text{SINR}_{(u,v)} = \frac{P_u * L(u, v)}{\mu_v + \sum_{(u', v') \neq (u, v)} P_{u'} * L(u', v)} \geq \beta \quad (1)$$

où  $\mu_v \in \mathcal{R}^+$  est le bruit thermique au récepteur. Un ensemble de transmissions simultanées est faisable si la condition SINR (eq. 1) est respectée à chaque récepteur. Nous appelons cet ensemble de transmissions une *configuration*, notée  $F$ . L'ensemble des configurations possible est noté  $\mathcal{F}$ . Chaque lien  $(u, v)$  est caractérisé par les paramètres physique suivants :

- $MCS_j$  : la modulation et le schéma de codage attribuée à la transmission  $(u, v, k)$ . Un  $MCS_j$  est caractérisé par un taux de codage  $CR_j$ , une constellation de taille  $M_j$  et un seuil SNR  $\beta_j$ .
- $c_{(u,v)}^k$  : la capacité du lien  $(u, v)$  à la fréquence  $k$ . Cette capacité dépend du  $MCS_j$  attribué à  $(u, v, k)$  :  $c_{(u,v)}^k = \frac{CR_j \log_2(M_j)}{T_A} N_{Sym} N_{Sub}$ , où  $T_A$  est le temps d'activation de la communication  $(u, v, k)$ ,  $N_{Sym}$  et  $N_{Sub}$  sont, respectivement, le nombre de symbole OFDM et le nombre de porteuses.
- $J_{(u,v)}^k$  : la consommation énergétique de la transmission  $(u, v, k)$ .  $u$  dépense un *coût de transmission*  $j_t^k(u)$  tandis que  $v$  dépense un *coût de réception*  $j_r^k(v)$ ,  $J_{(u,v)}^k = j_t^k(u) + j_r^k(v)$ .

### 3 Formulation du problème

Soit  $e = (u, v) \in E$ , on dit que le lien  $e$  appartient à la configuration  $F$  s'il existe une fréquence  $k$  telle que  $(u, v, k) \in F$ . La capacité du lien  $e$  dans la configuration  $F$  est notée  $c_e(F)$  et égale à  $\sum_{k, (u,v,k) \in F} c_e^k$ . Chaque configuration possible ( $F \in \mathcal{F}$ ) est caractérisée par une consommation énergétique  $J(F)$  qui prend en compte le coût de la transmission, la réception et le coût en veille des noeuds inactive :

$J(F) = \sum_{(u,v,k) \in F} (j_t^k(u) + j_r^k(v)) + \sum_{v \notin F} J_{idle}(v)$ . A chaque slot, seulement une configuration est active,  $W(F)$  représente la durée d'activation de la configuration  $F$ . Par la suite, la durée totale de la période  $T$  est égale à  $\sum_{F \in \mathcal{F}} W(F)$  pour une consommation énergétique totale de  $\sum_{F \in \mathcal{F}} W(F) J(F)$ .

Nous avons donc deux fonctions objectifs à optimiser : minimiser la consommation totale d'énergie  $\min \sum_F W(F) J(F)$  ou bien minimiser la période  $T = \min \sum_F W(F)$ . Vue la contrainte d'espace, on se restreint dans ce papier à ne présenter que le programme linéaire qui génère les configurations. Le reste des formulations que nous avons développées se trouve dans [3].

Le programme linéaire suivant permet de construire une configuration en respectant la contrainte d'interférences SINR présentée par la contrainte (Eq. 7). Le modèle de consommation énergétique prend en compte la consommation de transmission, réception et veille, contrainte (Eq. 3). Un nœud  $u$  transmet avec un débit  $C_l$  qui dépend du  $MCS_l$  utilisé, contraintes (Eq. 4)-(Eq. 5). La contrainte (Eq. 6) assure qu'un nœud ne peut pas transmettre et recevoir sur le même bloc de ressource.  $\Psi_{(w,u),k}^l$  est une variable binaire, égale à 1 si la communication  $(u, v, k)$  est active avec le MCS  $l$ , 0 sinon.

$$\max \sum_{e \in E} \sum_k (c_e^k \lambda_e) - \sigma \sum_u J_u \quad (2)$$

$$\forall u, v, k \quad J_u \geq \sum_k T_s * P_t^k(u) + \sum_k \sum_v \sum_l j_r^k(v) \Psi_{(v,u),k}^l + J_{idle}(u) \quad (3)$$

$$\forall u, v, k \quad c_e^k = \sum_l (C_l - C_{l-1}) \Psi_{(u,v),k}^l \quad (4)$$

$$\forall l, (u, v) \in E, k \quad \Psi_{(u,v),k}^{l-1} \geq \Psi_{(u,v),k}^l \quad (5)$$

$$\forall u, l, k \quad \sum_v \Psi_{(u,v),k}^l + \sum_w \Psi_{(w,u),k}^l \leq 1 \quad (6)$$

$$\forall u, v, k, l \quad P_t^k(u) * L(u, v) \geq \beta_l * \left( \sum_{(u', v') \neq (u, v)} P_t^k(u') * L(u', v) + \mu \right) - (1 - \Psi_{(u, v), k}^l) n P_{max} \quad (7)$$

$$\forall u, k, l \quad P_t^k(u) \leq P_{max} \quad (8)$$

## 4 Résultats et analyses

Nous considérons une grille de 24 stations de base et une passerelle placée au centre. Chaque station de base dispose de cinq MCS (Tab. 1) et d'une puissance de transmission maximale de 25W. Le modèle de propagation prend en compte le phénomène d'atténuation,  $L(u, v) = d(u, v)^{-\alpha}$  où  $\alpha$  est le coefficient d'affaiblissement fixé à 3.6. Le programme linéaire présenté dans ce papier et le reste des formulations présentées dans [3] sont implémentés sous AMPL/CPLEX. Ces outils d'optimisation nous permettent de calculer un fonctionnement pareto optimal du réseau (allocation de ressources, MCS et puissance de transmission pour chaque nœud) au sens de la capacité et de la consommation globale du réseau.

TABLE 1: Modulation et Schéma de Codage : MCS

MCS	Modulation	CR	$\beta$	Throughput	Efficiency
MCS1	QPSK	1/2	1.259	164 Kb/s	0.933 b/s/Hz
MCS2	16QAM	1/2	10	328.12 Kb/s	1.866 b/s/Hz
MCS3	16QAM	3/5	13.80	393.75 Kb/s	2.24 b/s/Hz
MCS4	64QAM	1/2	15.13	492.18 Kb/s	2.8 b/s/Hz
MCS5	64QAM	3/5	23.98	590.625 Kb/s	3.36 b/s/Hz

### 4.1 Apport du contrôle de puissance

Soit  $P_1$  (resp.  $P_5$ ) la puissance de transmission minimale qui satisfait l'activation des liens avec la modulation MCS1 (resp. MCS5). Nous étudions deux scénarii. Dans le premier, tous les nœuds transmettent avec une puissance maximale  $P_t = P_{max}$ . Dans le deuxième, chaque nœud contrôle sa puissance de transmission,  $P_t \leq P_{max}$ . La Fig. 1 présente la capacité et la consommation d'énergie optimale en fonction de  $P_{max}$  dans ces deux scénarii. Lorsque  $P_{max} = P_1$ , un nœud ne peut activer une transmission qu'avec MCS1 ce qui résulte en une capacité et une consommation faibles. Ensuite, en augmentant la puissance maximale, les MCS plus capacitifs deviennent disponibles au prix d'une augmentation de la consommation énergétique. Dans le cas de puissance fixe, la capacité de réseau évolue en escalier : augmenter la puissance de transmission ne fait qu'augmenter la consommation globale jusqu'à ce que le MCS suivant soit accessible. Par contre, avec le contrôle de puissance, les nœuds peuvent diminuer leur puissance de transmission afin de réduire les interférences. Ceci augmente la réutilisation spatiale ce qui résulte d'une part en une augmentation de la capacité et d'autre part en une réduction de la consommation totale. Dans ce cas, la consommation augmente seulement si la capacité s'améliore.

### 4.2 Apport du contrôle de modulation et codage

Dans cette partie, nous considérons deux cas. Dans le premier, tous les nœuds utilisent un seul MCS [4]. Dans le deuxième, à chaque transmission, un nœud peut choisir parmi quatre MCS (de MCS2, ..., MCS5 Tab. 1) <sup>†</sup>. L'étude du compromis entre la capacité et la consommation énergétique, pour chaque cas, est illustrée par la Fig. 2. Tout d'abord, on remarque pour chaque scénario une valeur minimale d'énergie requise pour écouler la demande des nœuds. Ensuite la capacité croît avec l'augmentation de l'énergie avant de tendre vers une borne maximale. On voit bien que dans le cas où les quatre MCS sont disponibles, on obtient de meilleures performances en capacité et consommation énergétique. En se restreignant à un seul choix de modulation, la seule manière d'augmenter la capacité est d'augmenter la réutilisation spatiale. L'utilisation conjointe de tous les MCS permet d'adapter les niveaux de puissance en utilisant des MCS plus robustes

<sup>†</sup>. Nous avons éliminé le MCS1 parcequ'il augmente considérablement le nombre des liens et donc le temps de calcul.

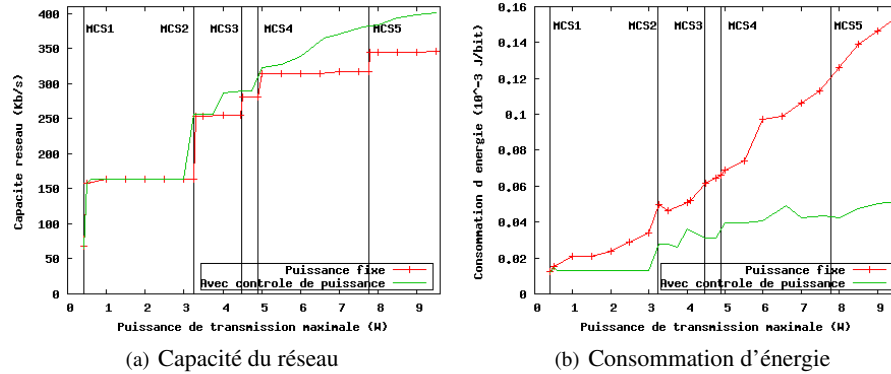


FIGURE 1: Apport du contrôle de puissance.

sur les liens peu chargés et en réservant les MCS plus capacitifs aux liens très sollicités. C'est ce que l'on observe sur la Fig. 3. La concentration du trafic sur la passerelle génère une zone de contention où les MCS les plus capacitifs sont utilisés avec peu de réutilisation spatiale, tandis que les liens périphériques peu chargés utilisent MCS1. Dans cette zone d'étranglement, le routage par les plus courts chemins est plus efficace pour améliorer la capacité du réseau. Un travail important doit être mené à partir de ces constatations pour développer un protocole d'allocation de ressources et de configuration des transmissions (puissance et MCS) organisant le réseau sur les mêmes principes.

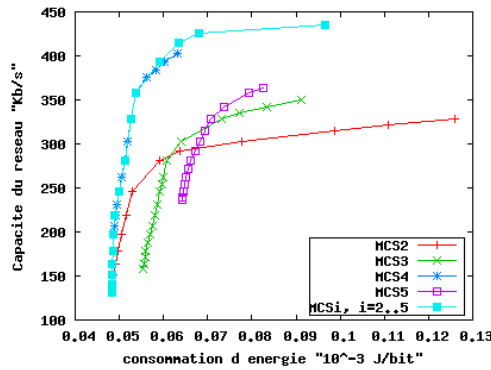


FIGURE 2: Compromis énergie-capacité : apport de MCS.

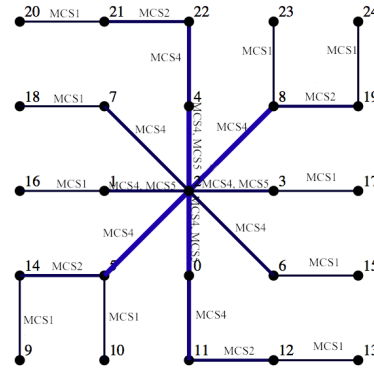


FIGURE 3: Repartition de MCS.

## Références

- [1] H. Rivano, F. Theoleyre, and F. Valois. A framework for the capacity evaluation of multihop wireless networks. *AHSWN*, vol. 9, number 3-4, Jan 2010.
- [2] P. Gupta and P. R. Kumar. The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46 :388–404, Mar 2000.
- [3] A. Ouni, H. Rivano, and F. Valois. On the Capacity and Energy Trade-off in LTE-like Network. In *the IEEE 73rd VTC'11*, Budapest, Hungary, May 2011.
- [4] A. Ouni, H. Rivano, and F. Valois. Wireless Mesh Networks : Energy - Capacity Tradeoff and Physical Layer Parameters. In *The 22nd Annual IEEE PIMRC'11*, Toronto, Canada, Sept 2011.